

Epitaksja krzemu. Kierunki rozwoju

Proces epitaksji służy w technologii przyrządów półprzewodnikowych do otrzymywania monokrystalicznej warstwy półprzewodnikowej na podłożu monokrystalicznym. W technice największe zastosowanie znalazły krzemowe warstwy epitaksjalne osadzone na podłożu z monokrystalicznego krzemu. Warstwa epitaksjalna ma taką samą orientację krystalograficzną jak podłoże; różni się jednak własnościami elektrycznymi, które mogą być dobierane i regulowane przez zmianę warunków prowadzenia procesu. Do masowej produkcji epitaksja krzemu została wprowadzona przez firmę RCA w 1964 r.

W praktyce przemysłowej warstwy epitaksjalne krzemu są otrzymywane metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD - Chemical Vapour Deposition) w układzie przepływowym otwartym. Układ ten pracuje najczęściej pod ciśnieniem atmosferycznym, lecz w ostatnich latach coraz większego znaczenia nabiera epitaksja w obniżonym ciśnieniu.

Inne metody wzrostu epitaksjalnego - epitaksja z fazy ciekłej (LPE - Liquide Phase Epitaxy), epitaksja z fazy stałej (SPE - Solide Phase Epitaxy) oraz epitaksja z wiązki molekularnej (MBE - Molecular Beam Epitaxy) - w przypadku warstw krzemu mają ograniczone zastosowanie.

PARAMETRY PŁYTEK KRZEMOWYCH Z WARSTWĄ EPITAKSJALNĄ I ZASTOSOWANIE W TECHNOLOGII PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

Podstawowymi parametrami warstw epitaksjalnych są: grubość, rezystywność, rozkład rezystywności w głąb warstwy oraz perfekcja strukturalna.

Produkowane obecnie warstwy epitaksjalne mają grubość od części mikrometra do ponad 100 μm i rezystywność od 0,005 do 100 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$. Skrajne wartości są najtrudniejsze do otrzymania i zwykle tego rodzaju warstwy są produkowane w małych ilościach w warunkach laboratoryjnych.

Zwykle przyjmuje się następujący podział warstw [1]:

a) pod względem grubości

- warstwy cienkie ($0,5 - 3 \mu\text{m}$),
- warstwy średnie ($3,0 - 10,0 \mu\text{m}$),
- warstwy grube ($10,0 - 20,0 \mu\text{m}$),
- warstwy bardzo grube (powyżej $20 \mu\text{m}$),

b) pod względem rezystywności

- bardzo silnie domieszkowane ($0,005 - 0,1 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$),
- silnie domieszkowane ($0,1 - 0,3 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$),
- średnio domieszkowane ($0,3 - 1 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$),
- bardzo słabo domieszkowane (powyżej $10 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$).

Warstwy cienkie, średnio domieszkowane są używane w diodach i tranzystorach mikrofalowych oraz w układach scalonych VLSI. Warstwy średnie, słabo domieszkowane są najczęściej stosowane w produkcji przyrządów dyskretnych i w technologii bipolarnej układów scalonych LSI. Warstwy grube, bardzo słabo domieszkowane są używane do produkcji przyrządów mocy oraz w technologii MOS VLSI.

Odstępstwa od perfekcji strukturalnej warstw określa się przez podanie gęstości błędów wzrostu, gęstości dyslokacji oraz liczby narostów krystalicznych. Kontrolowana jest również gęstość wad powierzchniowych. W ramach standaryzacji materiałów półprzewodnikowych został opracowany przez SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute) i ASTM (American Society of Testing and Materials), przy współudziale czołowych producentów krzemu, wykaz defektów i dopuszczalna ich liczba dla płytek z warstwami epitaksjalnymi [2].

Maksymalna dopuszczalna gęstość błędów wzrostu wynosi 25 na cm^2 , natomiast dopuszczalna liczba narostów na płytce zależy od średnicy płytki i grubości warstwy epitaksjalnej i zawiera się od 2 defektów na płytce o średnicy 2 cale dla warstwy o grubości $20 \mu\text{m}$ do 13 defektów na płytce o średnicy 125 mm i grubości warstwy $100 \mu\text{m}$.

W konstrukcji większości przyrządów dyskretnych wykorzystuje się złącze l-h (low-high), w którym na silnie domieszkowanym podłożu jest osadzana słabiej domieszkowana warstwa tego samego typu ($n-n^+$ lub $p-p^+$). Jako podłoże typu n stosuje się zwykle krzem domieszkowany antymonem o rezystywności około $0,01 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$. W przypadku, gdy konieczne jest obniżenie rezystancji szeregowej kolektora w przyrządzie (np. w przyrządach mikrofalowych), używa się podłoża o rezystywności poniżej $0,005 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$. Stosuje się wtedy monokryształ krzemu domieszkowany arsenem, ze względu na jego większą rozpuszczalność w krzemie w porównaniu z antymonem. Jako podłoże typu p stosuje się monokryształ domieszkowane borem o rezystywności ok. $0,01 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$.

Płytki podłożowe mają orientację $\langle 111 \rangle$ z dezorientacją od 2° do 5° w kierunku $\langle 110 \rangle$. Dezorientację wprowadza się w celu wytworzenia na powierzchni płytki stopni atomowych, które stanowią miejsca zarodkowania warstwy [3,4].

W technologii układów scalonych bipolarnych materiałem wyjściowym jest krzem monokrystaliczny o rezystywności rzędu kilku $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ i typie przewodnictwa przeciwnym niż osadzana warstwa epitaksjalna. Na styku podłożo-warstwa powstaje złącze p-n wykorzystywane w trakcie procesu technologicznego do wytwarzania wysp izolacyjnych. Przeważają konstrukcje, w których podłoże stanowi krzem typu p. W celu zmniejszenia rezystywności kolektora, w płytce podłożowej są wytwarzane metodą dyfuzji lub implantacji zlokalizowane obszary niskorezystywne, tworzące warstwę zagrzebaną. W przypadku epitaksji na warstwach zagrzebanych odpowiednia dezorientacja zapobiega przesunięciu i deformacji odwzorowania warstwy zagrzebanej. Oprócz płytek podłożowych o orientacji $\langle 111 \rangle$ z celową dezorientacją, stosuje się, lecz w dużo mniejszym zakresie, płytki o dokładnej orientacji $\langle 100 \rangle$.

W technologii VLSI dążenie do zwiększenia gęstości upakowania jest realizowane przez stosowanie coraz mniejszych elementów układu na powierzchni oraz zmniejszenie wymiarów w głąb płytki. Oznacza to osadzanie warstw o grubości $0,5\text{--}1,5\ \mu\text{m}$ na warstwach zagrzebanych domieszkowanych arsenem. Podstawowym warunkiem zachowania wymaganej geometrii elementów jest stosowanie niskiej temperatury w poszczególnych operacjach technologicznych. Jest to konieczne ze względu na:

- zmniejszenie, tak boczne jak i poziome, rozdyfundowania warstw domieszkowanych,
- lepszą kontrolę grubości i jednorodne domieszkowanie, na skutek zmniejszenia szybkości wzrostu warstwy,
- zmniejszenie deformacji płytek przez zmniejszenie wprowadzonych termicznie naprężeń,
- zmniejszenie gęstości defektów strukturalnych wprowadzonych w procesach wysokotemperaturowych.

Niektóre konstrukcje przyrządów, np. tranzystorów z epibazą, są oparte na strukturach epitaksjalnych dwuwarstwowych $n^+ - n - p$ i $p^+ - p - n$. Struktury wielowarstwowe są również stosowane w przyrządach mikrofalowych, w takich jak diody lawinowe i IMPATT [5,6].

Stosując kontrolowaną zmianę stężenia domieszki w fazie gazowej podczas procesu epitaksji, można otrzymywać warstwy epitaksjalne o zadanym profilu rezystywności w głąb warstwy. Znalazło to zastosowanie m.in. w produkcji diod o zmiennej pojemności [7].

Oprócz osadzania warstwy epitaksjalnej na całej płytce została opracowana technika selektywnego wzrostu krzemu w oknach wytrawionych w masce, którą

stanowi warstwa SiO_2 lub Si_3N_4 [8, 9, 10]. Epitaksja selektywna jest stosowana do wytwarzania szeregów mikrodiod używanych jako target w telewizyjnych lampach obrazowych [11, 12]. Daje ona możliwość uzyskania gęstości 10^5 - 10^6 mikrodiod/cm².

Proponuje się również stosowanie epitaksji selektywnej jako techniki pozwalającej na otrzymanie izolacji w geometrii VLSI. Selektywnie osadzona warstwa epitaksjalna jest otoczona ścianami SiO_2 . W warstwie są wytworzone struktury MOSFET z branką polikrzemową [13].

W niektórych konstrukcjach tranzystora VMOS obszar aktywny jest wytwarzany przez izotropowe trawienie rowków w warstwie epitaksjalnej o rezystywności kilku $\text{ohm}\cdot\text{cm}$, osadzonej na podłożu niskorezystywnym. Zwykle tranzystory VMOS wytwarza się na płaszczyźnie (100), a płaszczyznami ograniczającymi trawienie są płaszczyzny (111) [14].

W poprzednich latach głównym użytkownikiem krzemowych warstw epitaksjalnych była produkcja bipolarnych układów scalonych. Obecnie coraz częściej mówi się o celowości wprowadzenia warstw epitaksjalnych do technologii MOS VLSI [15]. Ukazują się opracowania o znamiennych tytułach: "Warstwa epitaksjalna blokuje niepożądany ładunek w MOS RAM" (Epitaxial layer blocks unwanted charge in MOS RAM's) [16], "Wysokorezystywna warstwa epitaksjalna może rozwiązać problemy MOS" (High resistivity epi may solve MOS problems) [17]. Podkreśla się następujące zalety stosowania wysokorezystywniej warstwy epitaksjalnej na niskorezystywnym podłożu, w stosunku do technologii tradycyjnej, wykorzystującej krzem Czochralskiego:

- większa mikrojednorodność rezystywności w warstwie epitaksjalnej zapewnia lepszą powtarzalność parametrów przyrządów,
- zwiększa się szybkość działania przyrządów, ponieważ w warstwie epitaksjalnej o rezystywności $\gg 50 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ występuje głębszy obszar zubożony i mniejsza pojemność pasożytnicza,
- w warstwie wysokorezystywniej zwiększa się czas życia elektronów,
- mniejsza gęstość defektów w warstwie zapewnia większą ruchliwość powierzchniową elektronów,
- dobrze przewodzące podłoże wymiata nadmiar elektronów,
- obszar zdefektowany na granicy podłoże-warstwa działa getterująco na defekty z obszaru aktywnego,
- zmniejsza się szkodliwe działanie cząstek α , gdyż indukowane przez nie pary elektron-dziura szybko rekombinują w niskorezystywnym podłożu.

Ze względu na niższą gęstość stanów powierzchniowych są używane płytki o orientacji $\langle 100 \rangle$, a nie $\langle 111 \rangle$. Obecnie stosuje się warstwy o rezystywności 30-50 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$, ale przewiduje się możliwość zastosowania warstw o bardzo wysokiej rezystywności (około 200 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$) w celu zmniejszenia pojemności pasożytniczej [18].

W sumie zastosowanie warstw epitaksjalnych pozwoli na zmniejszenie wymiarów geometrycznych przyrządów MOS, zwiększenie ich szybkości i niezawodności oraz poprawienie uzysku produkcji. Elementem hamującym wprowadzenie epitaksji do produkcji MOS VLSI jest wysoki koszt tej techniki. Przewiduje się, że do 1985 roku 70% krzemowych układów scalonych, tak bipolarnych jak i MOS, będzie wytwarzanych na warstwach epitaksjalnych [15].

Wymagania stawiane przez technologię VLSI oraz perspektywy znacznego rozszerzenia zastosowania techniki epitaksjalnej w produkcji MOS VLSI wyznaczyły następujące główne kierunki badań i działalności w latach 80-tych:

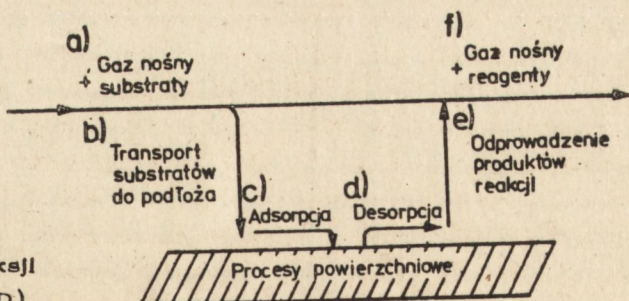
- W zakresie badań fizyko-chemicznych uzyskanie opisu matematycznego zjawisk zachodzących w reaktorze do epitaksji oraz stworzenie modeli, które pozwolą na optymalizację warunków prowadzenia procesu epitaksji oraz na automatyczne sterowanie procesem. Dodatkowo poszukuje się metod aktywacji procesu epitaksji, pozwalających na obniżenie temperatury wzrostu epitaksjalnego.
- W zakresie konstrukcji urządzeń do epitaksji poszukiwanie rozwiązań, które gwarantują minimalny rozrzut parametrów na płytkach, otrzymanie skokowego złącza na granicy podłoża-warstwa epitaksjalna w cienkich warstwach oraz zwiększenie stopnia wykorzystania urządzeń. Dodatkowym zadaniem jest włączenie epitaksji do systemu automatyzacji produkcji układów scalonych VLSI.

MODELOWANIE PROCESU EPITAKSJI

Teoria wzrostu epitaksjalnego w procesie CVD została przedstawiona w monografiach [3, 19, 20, 21], które zawierają pełną bibliografię prac opublikowanych na ten temat do 1978 roku.

Na rys. 1 są przedstawione podstawowe etapy procesu:

- a) wprowadzenie do reaktora gazu nośnego zawierającego substraty,



Rys. 1. Podstawowe etapy procesu epitaksji z fazy gazowej (CVD)

- b) dyfuzyjny transport substratów do powierzchni podłoża,
- c) adsorbpcja substratów na powierzchni, procesy powierzchniowe obejmujące reakcje chemiczne, dyfuzję powierzchniową i wiązanie osadzonych produktów z podłożem,
- d) desorbpcja produktów reakcji chemicznych,
- e) dyfuzyjny transport produktów do głównego strumienia gazu nośnego,
- f) odprowadzenie reagentów wraz z gazem nośnym z reaktora.

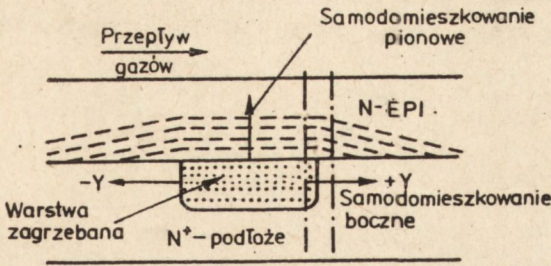
Etap, który w określonych warunkach prowadzenia procesu jest najwolniejszy decyduje o szybkości wzrostu warstwy.

Powszechnie stosowanym gazem nośnym jest wodór. Do gazu nośnego wprowadza się związek krzemu, którym jest najczęściej czterochlorek krzemu (SiCl_4) lub siłan (SiH_4), a rzadziej trójchlorosilan (SiHCl_3) i dwuchlorosilan (SiH_2Cl_2). Do gazu nośnego wprowadza się również związek zawierający domieszkę typu n (AsH_3 , PH_3) lub typu p (B_2H_6), w zależności od wymaganego typu przewodnictwa warstwy. Do reaktora dostaje się jednorodna mieszanina tych gazów. Strumień gazu przepływa nad grzejnikiem, na którym są ułożone płytki podłożowe z monokrystalicznego krzemu. Temperatura płytek podłożowych jest utrzymywana w zakresie 900 - 1250°C.

Parametrami technologicznymi, od których zależy wzrost epitaksjalny są temperatura podłoża, ciśnienie całkowite, ciśnienia cząstkowe składników zawierających krzem i domieszki, rodzaj związku krzemu oraz własności powierzchni podłoża - orientacja krystalograficzna i czystość powierzchni.

Powstało wiele - i w dalszym ciągu są opracowywane nowe - modeli wzrostu epitaksjalnego, opisujących zjawiska transportu w fazie gazowej oraz zjawiska powierzchniowe i ich wpływ na kinetykę wzrostu krzemu i wprowadzenie domieszki do warstwy [22, 23, 24, 25]. Między innymi metodą grafu przepływu otrzymano analityczny opis zależności szybkości wzrostu warstwy od parametrów technologicznych w bardzo szerokim zakresie temperatury z uwzględnieniem zmiany charakteru kontroli wzrostu - od kontroli przez procesy dyfuzji w gazie w wysokiej temperaturze, do kontroli przez zjawiska powierzchniowe w niskiej temperaturze [26, 27, 28].

Na podstawie fizykochemicznego modelu domieszkowania warstwy opracowano model komputerowy służący do symulacji profilu koncentracji domieszki w warstwie na podstawie warunków prowadzenia epitaksji [29]. Daje on możliwość przewidywania zmiany profilu na skutek dowolnych zmian warunków wzrostu z uwzględnieniem opóźnienia w osiągnięciu przez układ stanu ustalonego, co ma bardzo istotne znaczenie w przypadku bardzo cienkich warstw, o grubości submikronowej. W technologii bipolarnej VLSI duże znaczenie ma matematyczny opis rozkładu koncentracji domieszki na płytce z warstwą zagrzebaną, powstały w wyniku samodomieszkowania narastającej warstwy epitaksjalnej przez arsen z warstwy zagrzebanej [30, 31]. Charakter tego zjawiska pokazany jest na rys. 2.



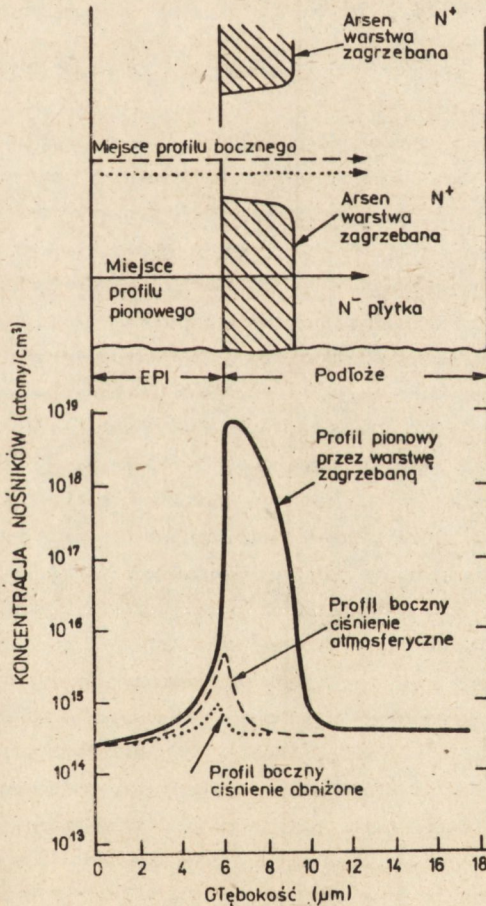
Rys. 2. Samodemieszkowanie warstwy epitaksjalnej przez domieszkę z warstwy zagrzebanej

Zjawisko samodemieszkowania jest szczególnie szkodliwe w przypadku bardzo cienkich warstw na podłożu silnie domieszkowanym arsenem. W celu ograniczenia samodemieszkowania podejmuje się szereg zabiegów technologicznych, takich jak obniżanie temperatury procesu, procesy dwuetapowe i maskowanie tylnej strony płytki. Największe nadzieje wiąże się jednak z zastosowaniem reaktorów do epitaksji z obniżonym ciśnieniem [18, 32, 33].

Podstawową cechą układu pracującego w obniżonym ciśnieniu jest ułatwiona dyfuzja substratów do powierzchni podłoża i odprowadzenie produktów z powierzchni.

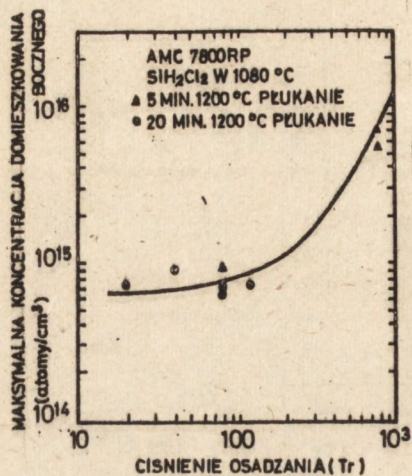
Zmniejszenie ciśnienia w reaktorze powoduje zmniejszenie prężności pary arsenu nad powierzchnią płytki oraz ułatwia jego odprowadzenie z reaktora przez strumień gazu. W rezultacie samodemieszkowanie zmniejsza się 5-10 razy. Na rys. 3 jest przedstawiony przekrój przez strukturę z warstwą zagrzebaną oraz profile koncentracji domieszki zdjęte na tej warstwie i obok niej. Na rys. 4 pokazano, jak zmniejsza się pik domieszkowania bocznego na skutek obniżenia ciśnienia w reaktorze.

Rys. 3. Przekrój przez płytkę z warstwą epitaksjalną osadzoną na warstwie zagrzebanej oraz profile koncentracji nośników



Epitaksja w obniżonym ciśnieniu daje przy tym znaczne zmniejszenie przesunięcia wzoru podczas epitaksji na warstwach zagrzebanych.

Obniżenie ciśnienia zmniejsza prądy konwekcyjne i zwiększa szybkość



Rys. 4. Wpływ ciśnienia gazu w reaktorze na wielkość maksimum domieszkowania bocznego

dyfuzji reagentów, co wpływa na polepszenie jednorodności grubości i rezy-
 tywności warstwy.

Został opracowany model matematyczny procesu CVD w obniżonym ciś-
 nieniu, który wiąże kinetykę procesu z parametrami technologicznymi [34].

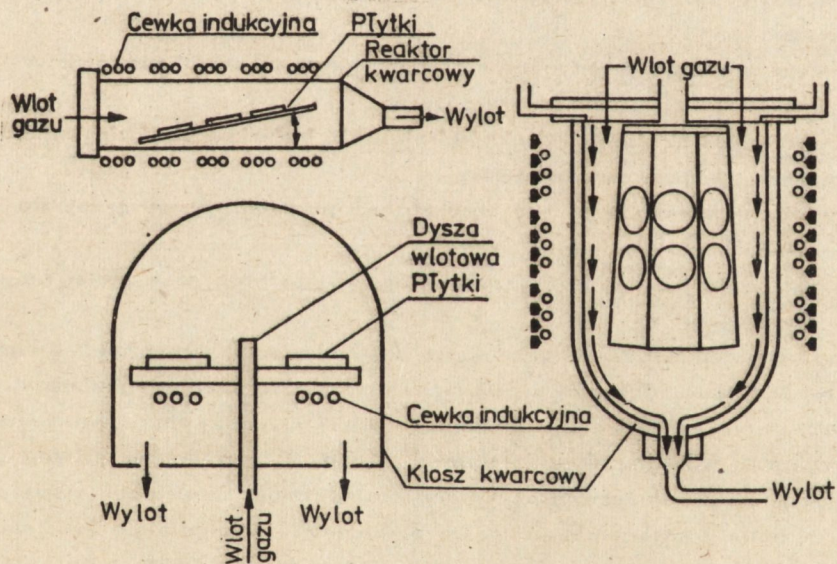
Oprócz opracowywania modeli fenomenologicznych, w ostatnich latach
 prowadził się coraz więcej eksperymentów mierzących do pomiaru para-
 metry procesu, głównie rozkładu temperatury w gazie i ciśnień cząstkowych
 reagentów wewnątrz reaktora podczas wzrostu. Badania są trudne ze wzglę-
 du na konieczność pomiaru parametrów gazu w wysokiej temperaturze.
 Dodatkowo, aby określić rozkład przestrzenny składu gazu, jego przepływ
 nad grzejnikiem nie powinien być zakłócony przez pomiar. Wykorzystuje się
 w tym celu pomiar rozproszenia Ramana [35], spektroskopię w podczerwieni
 [36] oraz spektroskopię masową [37]. Na podstawie tych pomiarów okreś-
 lono najbardziej prawdopodobny mechanizm reakcji chemicznych zachodzą-
 cych w reaktorze [38]. Holografie Interferencyjną wykorzystuje się do wli-
 zualizacji przepływu strumienia gazu w reaktorze i jego temperatury [39].

W związku z rozwojem epitaksji w obniżonym ciśnieniu wzrasta liczba
 prac dotyczących mechanizmu wzrostu warstw w tych warunkach. Obniżenie
 ciśnienia przesunęło kontrolę procesu w stronę zjawisk powierzchniowych i,
 poniżej kilku torów szybkość wzrostu jest limitowana przez te procesy.
 Zapoczątkowano badania powierzchni metodami spektroskopii elektronów,
 Augera (AES) oraz dyfrakcji elektronów odbitych o dużej energii (RHEED)
 [40, 41]. Układ analizujący został połączony poprzez próżniową komorę
 przejściową z komorą reakcyjną, w której prowadzono epitaksję w obniżonym

ciśnieniu. Pozwalało to na obserwację powierzchni narastającej warstwy w warunkach quasi in-situ, bez wyjmowania płytek na powierzchnię.

Epitaksja w obniżonym ciśnieniu nie rozwiązuje jednak problemu konieczności obniżenia temperatury procesu epitaksji. Dzięki wprowadzeniu plazmy do procesów CVD, temperaturę osadzania warstw polikrystalicznych i tlenków Si obniżono do 300-400°C [42, 43]. Stosowanie fotoaktywacji promieniami ultrafioletowymi pozwala również obniżyć temperaturę osadzania Si₃N₄ do około 200°C [44].

Żadna ze stosowanych metod - fotoaktywacja promieniami ultrafioletowymi, sublimacja w próżni, epitaksja z wiązki molekularnej, epitaksja w fazie stałej - nie daje w chwili obecnej możliwości produkcyjnego otrzymywania warstw o powtarzalnych parametrach [45]. Badania nad wspomaganie plazmowym procesem epitaksji (plasma enhanced epitaxy) są bardzo intensywne i prognozuje się, że w ciągu najbliższych dwóch, trzech lat ukażą się pierwsze rozwiązania produkcyjne [46].



Rys. 5. Typy reaktorów stosowane w produkcji krzemowych warstw epitaksjalnych

KONSTRUKCJA URZĄDZEŃ DO EPITAKSJI

W konstrukcji urządzeń do epitaksji poszukuje się rozwiązań, które gwarantują:

- ograniczenie rozrzutu grubości i rezystywności warstwy epitaksjalnej,
- ograniczenie zjawiska samodomieszkowania, szczególnie w warstwach submikronowych,
- zwiększenie stopnia wykorzystania urządzeń do epitaksji, zwłaszcza dla płytek o średnicy powyżej 3 cali,
- możliwość włączenia urządzeń do epitaksji do systemu automatyzacji produkcji układów scalonych VLSI.

Na rys. 5 są podane podstawowe typy reaktorów stosowanych obecnie w urządzeniach produkcyjnych. Ze względu na kierunek przepływu gazu i kształt grzejnika dzieli się je na:

- reaktory poziome (prostokątny grzejnik w rurze kwarcowej o przekroju prostokątnym),
- reaktory pionowe (obrotowy grzejnik w kształcie talerza w kotłaku kwarcowym),
- reaktory barytkowe (obrotowy grzejnik w kształcie ściętej piramidy w pionowo ustawionej rurze kwarcowej).

Model matematyczny zjawisk transportowych w powyższych reaktorach przedstawiono w [47, 48, 49].

Z modelu wynikają praktyczne ograniczenia w obecnie stosowanych reaktorach:

- niska wydajność reakcji chemicznych - 60% wchodzących reagentów opuszcza reaktor nie przereagowawszy,
- duże straty energetyczne - ze względu na promieniowanie grzejnika o dużej powierzchni,
- zależność grubości i rezystywności warstwy od położenia płytki na grzejniku,
- konieczność umieszczania grzejników (w reaktorach poziomych i barytkowych) pod kątem, ogranicza długość grzejnika i załadunek reaktora.

Są stosowane dwa rodzaje grzania grzejnika: indukcyjne i promieniowaniem podczerwonym. Stosowanie promieniowania podczerwonego ma szereg zalet: płytki krzemowe są nagrzewane równomiernie, dzięki czemu nie powstają w nich naprężenia prowadzące do pasm poślizgów i wygięcia płytek; jest możliwa dokładna kontrola temperatury za pomocą termopar, które łatwo włączyć do sterowania układu grzania; oszczędza się powierzchnię w pomieszczeniach, ponieważ nie ma oddzielnego generatora. Ten rodzaj grzania jest jednak bardziej kłopotliwy w obsłudze i konserwacji.

Wiele firm stosujących epitaksję w swojej produkcji używa urządzenia

własnej produkcji i konstrukcji (Wacker Chemitronic, RCA). W Europie największym producentem urządzeń do procesów CVD jest Advanced Semiconductor Materials w Holandii. Urządzenie z reaktorem poziomym Epilogic 21-3 mieści 21 płytek o średnicy 3 cale, ma grzanie halogenowymi lampami podczerwieni i jest całkowicie sterowane przez minikomputer.

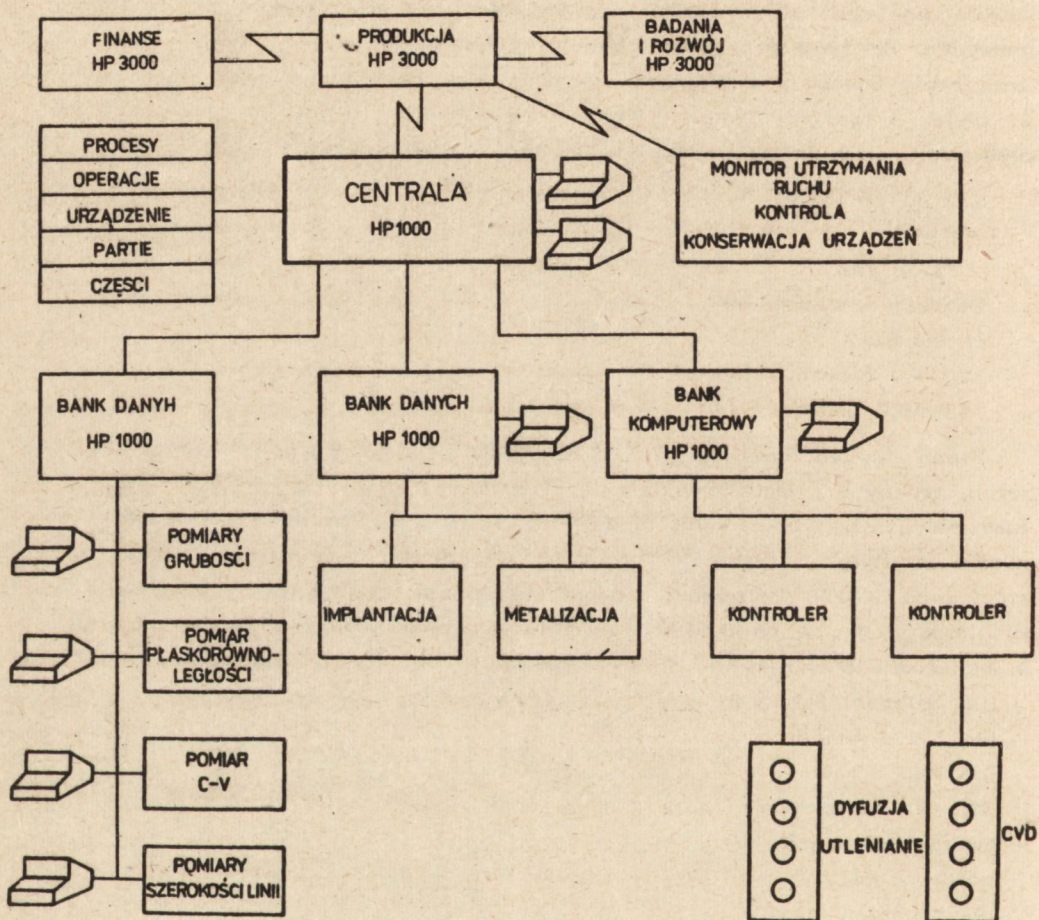
W reaktorach poziomych otrzymuje się najmniejszy rozrzut parametrów warstw, ponieważ nie występuje w nich zubożenie gazu w reagenty wzdłuż grzejnika. Od 1980 roku firma Epitaxy Equipment Inc. (USA) reklamuje urządzenie Gemini 1 z reaktorem pionowym, grzane indukcyjnie, o załadunku 21 płytek o średnicy 3 cale. Gwarantowane tolerancje parametrów warstw na płytkach o średnicy od 3 cali do 125 mm są następujące:

Zakres grubości warstwy	Tolerancja typowa	Tolerancja gwarantowana
1-10 μm	$\pm 2,5\%$	$\pm 5\%$
Zakresy rezystywności warstwy		
0,1-1,0 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$	$\pm 2,5\%$	$\pm 5\%$
1,0-10,0 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$	$\pm 5\%$	$\pm 7\%$

Firma Applied Materials (USA) specjalizuje się w reaktorach barytkowych, grzanych promieniowaniem podczerwonym, do pracy przy ciśnieniu atmosferycznym i obniżonym. Model AMC - 7850 RP (reduced pressure) mieści 30 płytek o średnicy 3 cale. Czas odpompowywania do ciśnienia roboczego 50-150 Torr wynosi 3 minuty i taki sam czas zajmuje powrót do ciśnienia 1 atm. W specyfikacji urządzenia znajdują się następujące dane:

- | | typowa | gwarantowana |
|--|---------------------------------|--------------|
| - jednorodność warstw dla grubości 3-25 μm | $\pm 2\%$ | $\pm 4\%$ |
| dla rezystywności 0,1-10,0 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ | $\pm 2\%$ | $\pm 4\%$ |
| 10,0-50,0 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ | $\pm 4,5\%$ | $\pm 6\%$ |
| - gwarantowana jakość powierzchni dla grubości 3-8 μm | błędy wzrostu 10/ cm^2 | narosty 3 |
| 8-25 μm | 10/ cm^2 | 5 |
- w stosunku do reaktora z ciśnieniem atmosferycznym zmniejszenie domieszki bocznej 5-100 razy, zmniejszenie grubości obszaru przejściowego 4-8 razy, zmniejszenie przesunięcia wzoru do zera.

We wszystkich używanych obecnie konstrukcjach pozostaje ciągle nierozwiązany problem małej przepustowości urządzeń do epitaksji. W innych procesach CVD, w których są używane piece z gorącymi ścianami typu pieców



Rys. 6. System kontroli procesu wytwarzania płytek krzemowych (CICO) [52]

do dyfuzji, płytki są usytuowane pionowo i załadunek wynosi około 200 płytek 3 cale, czyli dziesięć razy więcej, niż w urządzeniu do epitaksji. Urządzenia tego typu są stosowane do osadzania polikrystalicznego krzemu, Si_3N_4 i SiO_2 . Procesy te są jednak prowadzone w niższych temperaturach. W przypadku procesu epitaksji, przebiegającego w temperaturze ponad 1000°C , podstawowym problemem jest osadzanie się krzemu na gorących ściankach reaktora oraz związane z tym silne zubożenie gazu w reagenty wzdłuż reaktora [50].

Zastosowanie reaktora z gorącymi ścianami ma wiele walorów ekonomicznych i trwają intensywne prace nad rozwiązaniem konstrukcyjnym oraz badania termodynamiczne układu. Na ostatniej konferencji dotyczącej procesów CVD [51] przedstawiono wyniki badań wzrostu epitaksjalnego w reaktorze z gorącymi ścianami typu pieca dyfuzyjnego, które wskazują, że przy odpowiednim doborze gradientu temperatury w piecu oraz zapewnieniu odpowiedniego przesycenia par krzemu nad płytkami udaje się uzyskać jednorodny wzrost na płytkach ustawionych pionowo.

Równolegle są prowadzone prace nad włączeniem urządzeń do epitaksji do zautomatyzowanej produkcji. Czołowi producenci przyrządów półprzewodnikowych zapowiadają całkowitą automatyzację procesów w ciągu najbliższych trzech lat. W tej chwili w masowej produkcji jest stosowana automatyczna kontrola ciśnienia i szybkości przepływu gazów, temperatury płytek oraz załadunku i wyładunku płytek.

W firmie Hewlett Packard od siedmiu lat na linii CMOS VLSI w Cupertino (Kalifornia) jest stosowana pełna automatyzacja w programie Cupertino IC Operation (CICO) [52]. W wyniku tego programu osiągnięto zwiększenie ilości i jakości produkcji, zmniejszenie kosztów produkcji i oszczędność energii, nastąpiło zwiększenie bezpieczeństwa pracy i poprawa konserwacji urządzeń oraz uzyskano historycznie usystematyzowane dane do analizy ekonomicznej dla kierownictwa.

Na rys. 6 jest przedstawiony układ kontroli produkcji płytek i przepływ informacji w programie CICO.

Kluczem do opłacalności zautomatyzowania produkcji VLSI jest:

- standaryzacja urządzeń produkcyjnych, odpowiednio do możliwości układu komputerowego,
- mechaniczny transport i operowanie płytkami w znormalizowanych kasetach,
- stosowanie urządzeń i oprzyrządowania, które zapewniają małą gęstość defektów tak, aby dane pomiarowe i uzyskane wykresy odzwierciedlały wpływ parametrów technologicznych na wyniki,
- stosowanie udoskonalonych przyrządów diagnostycznych i kalibracyjnych oraz systemów mikroprocesorowych do sterowania pracą, w celu skrócenia czasów międzyoperacyjnych.

Problemem standaryzacji urządzeń mającej na celu automatyzację linii produkcyjnych zajmuje się SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute). W tomie "Urządzenia" w książce standardów, wydanej w 1983 roku [53], określono szczegóły języka stosowanego pomiędzy urządzeniem a komputerem centralnym. Wybrano zestaw informacji, które wyczerpują najbardziej typową działalność w produkcji układów scalonych. Informacje są określone do takiego stopnia szczegółowości, aby oprogramowanie dowolnego komputera mogło być skonstruowane przy minimalnej znajomości indywidualnego urządzenia i odwrotnie, aby urządzenie mogło być skonstruowane przy minimalnej znajomości komputera.

Podkomitet SEMI zajmujący się epitaksją krzemu zakończył standaryzację płytek o średnicy 125 mm, a w 1983 roku pracuje nad zastosowaniem kodu alfanumerycznego do oznakowania i identyfikacji płytek z warstwą epitaksjalną oraz opracowaniem przewodnika do inspekcji płytek.

W dążeniu do automatyzacji procesu epitaksji jest rozważana koncepcja wzrostu epitaksjalnego na pojedynczych płytkach z pełnym wykorzystaniem możliwości cyklu "z kasety do kasety". Zaletą tej koncepcji jest możliwość dokładniejszej kontroli i powtarzalności wzrostu oraz zmniejszenie rozrzutu parametrów, wadą natomiast - wzrastające znacznie koszty produkcji i zmniejszający się stopień wykorzystania urządzeń. Firma ASM/America przewiduje, że w ciągu następnych 5-10 lat zostanie opracowany kombinowany system, łączący zalety transportu "z kasety do kasety" oraz procesu z dużym wśadem. Jednocześnie wprowadzenie reaktorów z gorącymi ścianami, zastosowanie plazmy oraz obniżonego ciśnienia rozwiązałoby podstawowe problemy ekonomiczne i techniczne stojące przed epitaksją - zwiększenie stopnia wykorzystania, obniżenie temperatury procesu i włączenie do zautomatyzowanej produkcji.

(Tekst dostarczono 22.09.1983 r.)

LITERATURA

1. Hammond L.M.: *Solid St. Technol.*, 11, 68, 1978
2. Moore G. E. Sr.: *Microelectronics J.*, 10, 30, 1979
3. *Current Topics in Materials Science*, vol. 1, ed. E. Kaldis, North Holland Publ., 1978
4. *Epitaxial Silicon Slices*, Wacker-Chemitronic Product Specification E 1050, 1982
5. Wen C. P., Chiang Y. S., Denlinger E. J.: *Electrochem. Soc.*, 122, 119, 1975
6. Watts B. F., Howard A. M., Gibbons G.: *Electronics Let.*, 9, 183, 1973
7. Jackson D. N.: *Solid St. Electron.*, 20, 485, 1977
8. Druminski M., Gessner R.: *J. Crystal Growth*, 31, 312, 1975
9. Bollen L. J. M.: *Acta Electron.*, 21, 185, 1978
10. Bollen L. J. M., Van den Brekel C. H. J., Kuiken H. K.: *J. Crystal Growth*, 51, 581, 1981
11. Engler W. E., Blumenfeld M., Taft E. A.: *Appl. Phys. Let.*, 16, 202, 1970
12. Drozdova M. V., Sukhanov V. L., Tuchkevich V. V., Schmidt N. M., Yavich B. S.: *Thin Solid Films*, 36, 383, 1976
13. Endo N., Tanno K., Ishitani A., Kurogi Y., Tsuya H.: *Intern. Electron Devices Meet.*, San Francisco, Dec. 1982
14. Wilamowski B.: *Specjalne przyrządy półprzewodnikowe*, WKT, Warszawa, 1982
15. Bean K.: *Thin Solid Films*, 83, 173, 1981
16. Mohań Roo G. R., White L. S. Jr., Gossen R. N.: *Electronics*, 30, 103, 1981
17. *Art. red. Semiconductor Int.*, 4, 71, 1980
18. Herring R. B.: *Solid St. Technol.*, 11, 75, 1979
19. Wolf H. F.: *Półprzewodniki*, WNT, Warszawa, 1975
20. *Current Topics in Materials Science*, vol. 2, ed. E. Kaldis, North Holland Publ. Co., 1977
21. *Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej*, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1980
22. Subrahmanyam J., Lahiri A. K., Abraham K. P.: *J. Electrochem. Soc.*, 127, 1394, 1980
23. Kosza G., Kuznetsov A., Kormany T., Nagy L.: *J. Crystal Growth*, 52, 207, 1981
24. Reif R., Kamins T. I., Saraswat K. C.: *J. Electrochem. Soc.*, 126, 644, 1979
25. Reif R.: *J. Electrochem. Soc.*, 129, 1122, 1982
26. Korec J.: *J. Crystal Growth*, 46, 362, 1979
27. Korec J.: *Surface Technol.*, 10, 433, 1980
28. Korec J.: *Surface Technol.*, 10, 455, 1980
29. Reif R., Dutton R. W.: *J. Electrochem. Soc.*, 128, 909, 1981
30. Srinivasan G. R.: *J. Appl. Phys.*, 51, 4824, 1980
31. Kühne H.: *Crystal Res. Technol.*, 17, 1097, 1982
32. Krullmann E., Engl W. L.: *IEEE Trans. Electron Devices*, 4, 491, 1982
33. Kühne H.: *Crystal Res. Technol.*, 17, 181, 1982
34. Kuiper A. E. T., Van den Brekel C. H. J., De Groot J., Veltkamp G. W.: *J. Electrochem. Soc.*, 129, 2288, 1982
35. Bouix J., Berthet M. P., Boubehira M., Dazord J., Vincent H.: *J. Electrochem. Soc.*, 129, 2338, 1982
36. Nishizawa J., Nihira H.: *J. Crystal Growth*, 45, 82, 1978
37. Ban V. S.: *J. Japan Assoc. Crystal Growth*, 5, 119, 1978
38. Nishizawa J., Saito M.: *J. Crystal Growth*, 52, 213, 1981
39. Gilling L. J.: *J. Electrochem. Soc.*, 129, 635, 1982
40. Hottier F., Theeton J. B.: *J. Crystal Growth*, 48, 644, 1980

41. Hottier F., Cadoret R.: *J. Crystal Growth*, 52, 199, 1981
42. Vandenberg M.: Properties of Plasma Deposited Silicon Oxide, Abstr. 99, 155th Electrochem. Soc. Meeting, May 1979
43. Van de Ven E., Sanders J. A. M.: Plasma Deposition of Silicon Dioxide, Abstr. 196, 158th Electrochem. Soc. Meeting, Oct. 1980
44. Peters J. W., Gebhart F. L., Hall T. C.: *Solid St. Technol.*, 9, 121, 1980
45. Su S. C.: *Solid St. Technol.*, 3, 72, 1981
46. Bettes T. C.: *Solid St. Technol.*, 3, 39, 1982
47. Juza J., Cermak J.: *J. Electrochem Soc.*, 129, 1629, 1982
48. Ban V. S.: *J. Crystal Growth*, 45, 97, 1978
49. Ban V. S.: *J. Japan Assoc. Crystal Growth*, 5, 119, 1978
50. Langlais F., Hottier F., Cadoret R.: *J. Crystal Growth*, 56, 659, 1982
51. De Moor H. H. C., Hanssen J. H. L., Gilling L. J., Bloem J.: Epitaxial Growth of Silicon by CVD in a Furnace, Proc. 4th European Conf. CVD, May 1983
52. Gilliland J., Ligtenberg A.: *Microelectronic Manufacturing and Testing*, 6, 46, 1983
53. Book of SEMI Standards 1983, vol. 2 (Equipment Division)